

DISS. ETH NO. 26821

Reliability and Ruggedness of Silicon Carbide MOSFETs

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
THOMAS ZIEMANN
M.Sc., RWTH Aachen University

born on 02.12.1987
Citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ulrike Grossner
Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski
Matti Laitinen

2020

Abstract

Silicon carbide MOSFETs are capable of improving the efficiency, size, weight and cost of power electronic converters compared to silicon IGBTs. In order for these improvements to be realized and for SiC MOSFETs to become widely used, their reliability and ruggedness need to be understood. This is especially critical for applications like automotive and aerospace, which require high reliability and could profit greatly from the advantages of SiC MOSFETs. For these reasons, the presented thesis aims to contribute to the understanding and improvement of ruggedness and reliability in commercial devices.

First, a large number of types from nearly all manufacturers of discrete SiC MOSFETs is selected and characterized. High variability is found from sample to sample, with large differences between manufacturers. The reliability of these devices is then investigated using power cycling tests, employing and validating a SiC cycling methodology with stable temperature measurement. The results show the influence of variability and again large differences between manufacturers, with some devices failing after a few thousand cycles and others lasting until the test is stopped at 250,000 cycles. Failures due to cosmic ray impacts are also investigated, with the findings showing the same failure rate per device area for all types and manufacturers, depending only on device breakdown voltage.

Ruggedness under extreme events like short circuit and avalanche is tested to characterize how long the devices can withstand these conditions. The failure process is observed using high-speed imaging,

showing damage long before complete failure. Consequently, a fast, flexible protection circuit is presented, which can prevent failures and does not degrade nominal performance as device adjustments do.

Overall, the results show that SiC MOSFETs are a very promising, but not yet mature technology. Compared to silicon IGBTs, consistency and reliability are lower, but these topics are now moving into focus for manufacturers, leading to higher quality devices. The remaining weaknesses of SiC MOSFETs in ruggedness and reliability can be mitigated by fast protection and improved packaging, which will also enable optimal utilization of the devices' strengths in performance.

Zusammenfassung

Siliziumkarbid-MOSFETs sind in der Lage, Effizienz, Grösse, Gewicht und Kosten von leistungselektronischen Umrichtern zu reduzieren. Um diese Verbesserungen in der Realität umzusetzen und Siliziumkarbid-MOSFETs zu breiter Verwendung zu verhelfen, müssen ihre Zuverlässigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber extremen Bedingungen untersucht werden. Dies gilt besonders für Anwendungen in Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, welche hohe Zuverlässigkeit voraussetzen und von den Vorteilen von Siliziumkarbid-MOSFETs stark profitieren könnten. Aus diesen Gründen ist es das Ziel dieser Arbeit, zum Verständnis und zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Unempfindlichkeit von kommerziellen Bauteilen beizutragen.

Zunächst wird eine grosse Anzahl an Typen von nahezu allen Herstellern diskreter Siliziumkarbid-MOSFETs ausgewählt und charakterisiert. Eine hohe Variabilität von Exemplar zu Exemplar wird festgestellt, mit grossen Unterschieden zwischen den Herstellern. Die Zuverlässigkeit dieser Bauteile wird mittels „power cycling“ untersucht, wobei eine für Siliziumkarbid angepasste Methodik mit stabiler Temperaturmessung verwendet und validiert wird. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss der Variabilität und erneut grosse Unterschiede zwischen den Herstellern. Manche Exemplare fallen nach wenigen Tausend Zyklen aus, während andere bis zum Abbruch des Tests bei 250'000 Zyklen funktionieren. Ausfälle durch kosmische Strahlung werden ebenfalls untersucht; die Ergebnisse zeigen die gleiche Ausfallrate pro Bauteilfläche für alle Typen und Hersteller, die nur von der Durchbruchspannung des Bauteils beeinflusst wird.

Die Unempfindlichkeit gegenüber aussergewöhnlichen Ereignissen wie Kurzschluss und Lawinen-Durchbruch wird geprüft, um zu wissen, wie lange die Bauteile diese Bedingungen aushalten. Der Ausfallprozess wird mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen untersucht und es werden schon deutlich vor dem Ausfall bleibende Schäden gefunden. Aus diesem Grund wird eine schnelle, anpassungsfähige Schaltung gezeigt, welche Ausfälle verhindert und — im Gegensatz zu Bauteilveränderungen — keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Siliziumkarbid-MOSFETs eine sehr vielversprechende, aber noch nicht ausgereifte Technologie sind. Im Vergleich zu Silizium-IGBTs sind die Konsistenz und Zuverlässigkeit geringer, aber diese Themen bewegen sich nun in den Fokus der Hersteller und die Qualität der Bauteile verbessert sich. Die verbleibenden Schwächen von Siliziumkarbid-MOSFETs in der Unempfindlichkeit und Zuverlässigkeit können durch schnelle Schutzschaltungen und optimierte Aufbau- und Verbindungstechnik kompensiert werden, wodurch die Stärken in der Leistungsfähigkeit voll ausgeschöpft werden können.